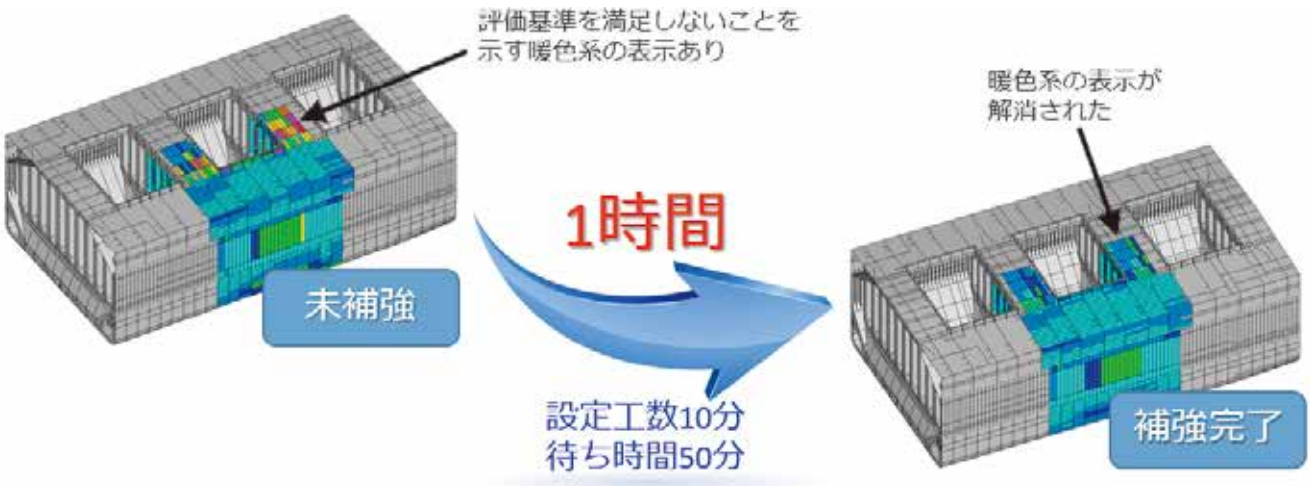
株式会社名村造船所

# CSR HOLD 解析のための補強検討自動化機能の開発

田中　孝幸*
Tanaka Takayuki

IACS(国際船級協会連合)が策定した CSR(ばら積み貨物船および油タンカーのための共通構造規則)において，有限要素解析から得られた応力を用いて HOLD 部の降伏・座屈強度評価(HOLD 解析)を実施し，評価基準を満足した寸法とすることが要求されている．この強度評価では評価基準を満足した結果が得られるまで補強を繰り返す必要があり，多くの設計工数および期間を費やしている．この状況を打開すべく汎用解析ソフト Jupiter をベースに，HOLD 解析の補強を自動で行う機能を開発した．開発した機能により，CSR で要求される HOLD 解析作業は省力化され，評価基準を満足した補強寸法の情報が数時間で得られるようになり，設計者はその後，補強寸法の確認や調整作業を行うだけで済むようになった．通常の設計では，設計者がこの作業を数日～1 週間かけて補強寸法を決定しているため工数削減と期間短縮を見込むことが出来る．また，この機能を使えば解析を含めた構造配置検討や既存船の寸法・重量削減検討などが可能となる．なお，本記事はテクノスター 造船ユーザーカンファレンス 2023 で公表した内容となる．




第 1 図　補強検討自動化機能のイメージ

## 1．緒言

CSR で要求される HOLD 解析は貨物倉区域に存在する全ての HOLD を対象に，3HOLD モデルを用いて実施する必要がある．この 3HOLD モデルは，モデル中央に評価対象 HOLD があり，それに隣接する船首側および船尾側の HOLD までを包括したモデル範囲となっている．例えば 7 つの HOLD を有するパナマックスサイズのばら積み貨物船の場合，3HOLD モデルを 7 つ用意する必要がある．

3HOLD モデルの評価対象 HOLD である中央 HOLD を評価し，得られた結果に対して評価基準を満足しない部位について

原稿受理日：July 31, 2024
*株式会社名村造船所　船舶海洋事業部　設計本部　基本設計部　船殻設計課

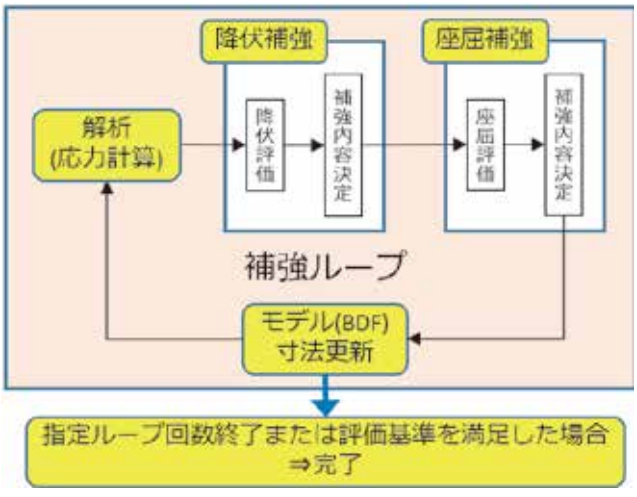
は増厚や高ハイテン化またはカーリング等の補強を行い，その後再評価を実施して，評価基準を満足しているかを確認する．この作業を繰り返すことで評価基準を満足した寸法を得ることが出来る．

複数の 3HOLD モデルに対して設計者が実施しているこの繰り返し作業を自動化し作業時間を短縮するために，株式会社テクノスターの協力の下，同社が提供している汎用解析ソフト Jupiter[1] をベースとしてプラグイン形式の補強検討自動化機能を開発することとした．補強検討自動化機能のイメージを第 1 図に示す．

## 2．補強検討の自動化

### 2．1　評価と補強の手順

補強検討の自動化にあたり，その手順を第 2 図の通り考案した．この手順では解析で求めた応力を用いて，まず降伏評価を実施し，評価基準を満足しない場合に降伏補強を実施する．次に解析で求めた応力と降伏補強で求めた寸法を用いて座屈評価を実施し，評価基準を満足しない場合に座屈補強を実施する．その後，座屈補強が終わった時点の寸法をモデルに反映し，再度解析を実施して応力を求める．さらに 2 回目以降の降伏補強，座屈補強，解析と続けていく．このように補強のループ処理を実施し，指定したループ回数に達するか評価基準を全て満足するまでこのループを繰り返す仕様とした．




第 2 図　補強ループの内容

### 2．2　PrimeShip-HULL(DSA) とのデータ連携

自動補強を実行するにあたり必要な 3HOLD モデル及び設計条件は，一般財団法人日本海事協会が提供している CSR 対応構造評価ソフトウェアである PrimeShip-HULL(DSA)[2] の標準的な入出力機能から出力したデータを，第 3 図に示す読み込み画面で読み込む仕様とした．なお，PrimeShip-HULL(DSA) からファイルを出力し，Jupiter で読み込み完了するまでに掛かる時間は 10 分弱である．この仕様とした理由は，PrimeShip-HULL(DSA) のデータは通常設計において作成しているものであり，そこから出力したデータを利用することで，補強検討自動化機能に設計者が設計条件を別途入力するという作業を省略することができるためである．また，PrimeShip-HULL(DSA) で自動作成された荷重条件をそのまま使用できるため，規則改正がある度にプログラムを改修しなくて良いという利点と，設計条件の入力ミスを防止できるという利点がある．

自動補強完了後には，PrimeShip-HULL(DSA) へ受け渡すための補強済み 3HOLD モデル及びカーリング補強が反映された座屈パネルの情報が自動で出力される．これらを PrimeShip-HULL(DSA) の Import 機能を用いて読み込むことにより，約 5 分で PrimeShip-HULL(DSA) データが出来上がる．そこから荷重作成，解析，評価，レポート出力まで行っても追加の所要時間は約 15 分であり，入出力に要する時間は少ない．なお，自動補強完了後に再度 PrimeShip-HULL(DSA) のデータを再構築する理由は，最終的に船級プログラムである PrimeShip-HULL(DSA) を用いて評価基準を満足している事を確認するためである．

第 3 図　PrimeShip-HULL(DSA) からの情報の読み込み画面

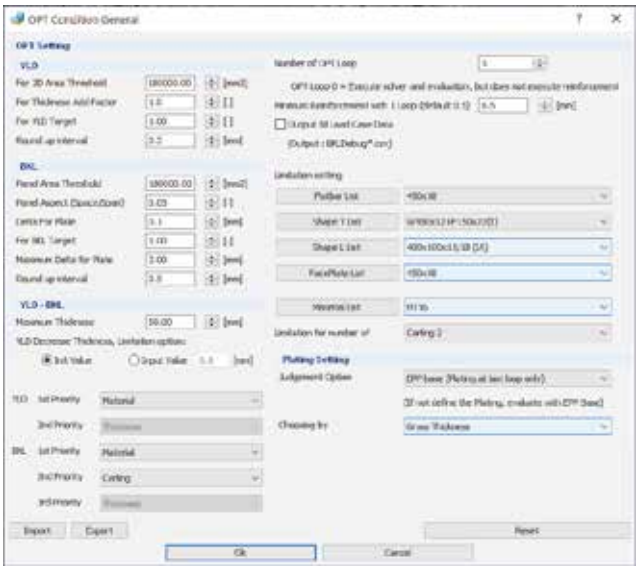
## 3．補強条件の設定と自動補強実行

### 3．1　一般設定

降伏補強および座屈補強において，材料の降伏応力を上げる/増厚する/カーリングを追加するという選択肢がある．

補強検討自動化機能ではこれらの補強の優先順位の設定(第4図)を行うことが出来る．また，その他に材料の降伏応力の上限，増厚の上限，カーリング本数の上限，防撓材寸法や面材寸法のリスト，補強ループの回数など多くの設定項目を用意し，補強の自由度を高くしている(第5図)．一方で，これら多くの項目を一つ一つ設定するのは工数が掛かる．そのため，設定画面にはデフォルト値が入力された仕様とし，設計者は基本的にOKボタンを押すだけで良いようにした．

第4図　補強の優先順位の設定画面
(第5図から抜粋)



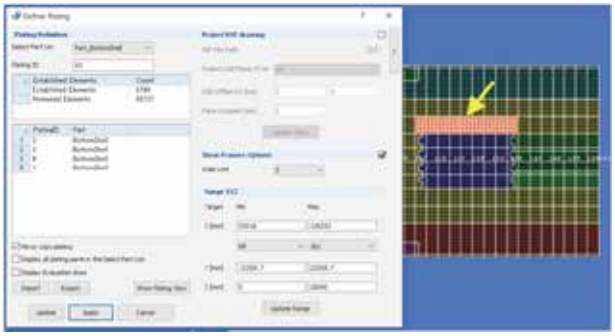
第5図　一般設定画面の全体

3．2　追加設定(任意)

第3章第1節の一般設定が適用される対象は，基本的に全ての部材となるが，部材の種類(例えばFloor)又は特定の部材(例えばFr.200のFloor)に対して一般設定とは別の補強条件を任意で設定することも出来る仕様とした．ここで追加設定がされないものについては，一般設定が適用されることとなる．

3．3　板割りグループ設定(任意)

「同じ板厚」かつ「同じ降伏応力の材料」で補強される2D要素グループを設定することで，防撓材や板部材等で囲まれた最小の板要素である基本板パネル単位ではなく，板割りベースの補強を表現できる仕様とした(第6図)．これにより板厚分布が実設計のモデルと同じになるため，より精度の高い補強寸法が得られる．なお，全ての部材に対して設定が必要ではなく，部分的に設定することも可能で，ここで設定されない場合は基本板パネル単位で補強が実施される．



第6図　板割りグループの設定画面

3．4　自動補強の実行

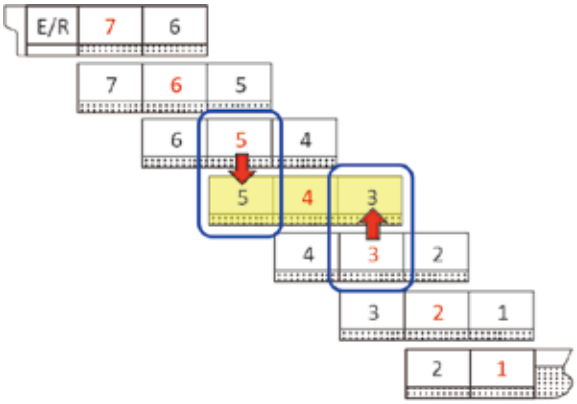
一般設定および任意の設定完了後に自動補強を実行すると，補強ループの処理が始まり，中型～大型のばら積み貨物船の場合，5回の補強ループであれば約50分で完了する．PrimeShip-HULL(DSA)から出力したファイルを Jupiter で読み込み，約10分で一般設定まで完了したとすると，任意の設定を省略した場合には，約1時間後に評価基準をほぼ満足した寸法が得られるということになる(第1図)．

## 4．隣接HOLDの補強寸法反映機能

4．1　隣接HOLDの寸法

3HOLDモデルの中央に位置する評価対象HOLDに対し設計者は評価基準を満足する様に補強を行うが，補強開始直後の時点では3HOLDモデルの両端に位置するHOLD(隣接HOLD)には補強が入っていない．しかし，これらの隣接HOLDは別の3HOLDモデルにおいては中央HOLDとなっており，実際には解析補強が入ることとなる．隣接 HOLD の寸法は 3HOLD モデル全体の変形や応力状態に影響があるため，評価対象 HOLD ではなくとも解析補強が入った寸法とする必要がある．そのため，他の3HOLDモデルの中央HOLDの寸法が変わった場合には，3HOLDモデルの端部に位置する隣接HOLDの

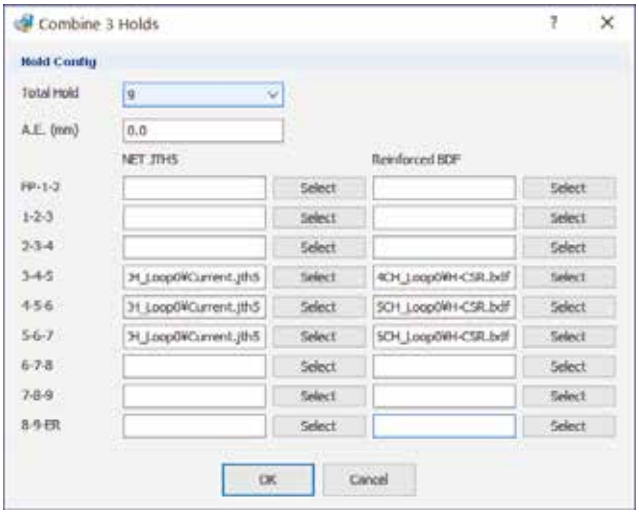
寸法を変え，再評価が必要となる．例えば，パナマックスサイズのばら積み貨物船の NO.3 及び NO.5 CARGO HOLD の補強寸法は，No.4 CARGO HOLD 評価用の 3HOLD モデルの両端の HOLD にそれぞれ反映する必要がある(第7図)．この様に，複数の 3HOLD モデルが互いに影響し合う状況の中で HOLD 解析では CSR で定められた評価基準を満足するまで繰り返し評価および補強を繰り返す必要があり，この微調整作業にも多くの設計工数および期間を費やしている．




第7図　No.4 CARGO HOLD 評価用モデルに影響する他の 3HOLD モデルの位置関係

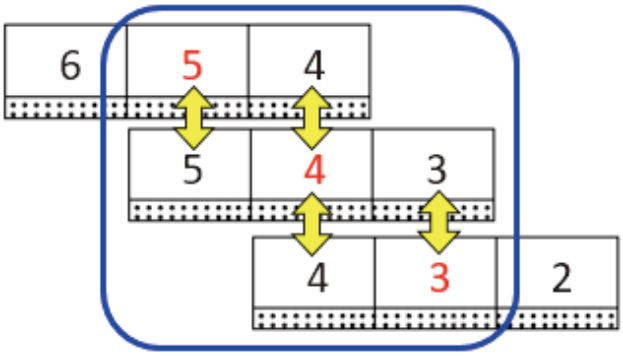
### 4．2　隣接 HOLD の寸法反映機能

3HOLD モデルの両端に位置する隣接 HOLD の寸法を更新する作業はこれまで手動で行ってきた．この作業を自動化するために，自動補強を実施済みの複数の 3HOLD モデルの両端に位置する HOLD の寸法を相互に反映する機能を開発した．ユーザーインターフェースとしては，隣接 HOLD の寸法を反映したい 3HOLD モデルのフォルダパスを指定して OK ボタンを押すだけのシンプルなものとした(第8図)．




第8図　隣接 HOLD の寸法反映機能の設定画面

なお，第9図のように3つの 3HOLD モデルの寸法およびカーリング本数の情報を相互に反映させる場合の所要時間は数分であり，設計者が数時間かかっていた作業が極めて短時間で完了する．




第9図　3つの 3HOLD モデルの寸法等の相互反映

## 5．その他の付属機能

### 5．1　PSJ を用いたバッチ処理

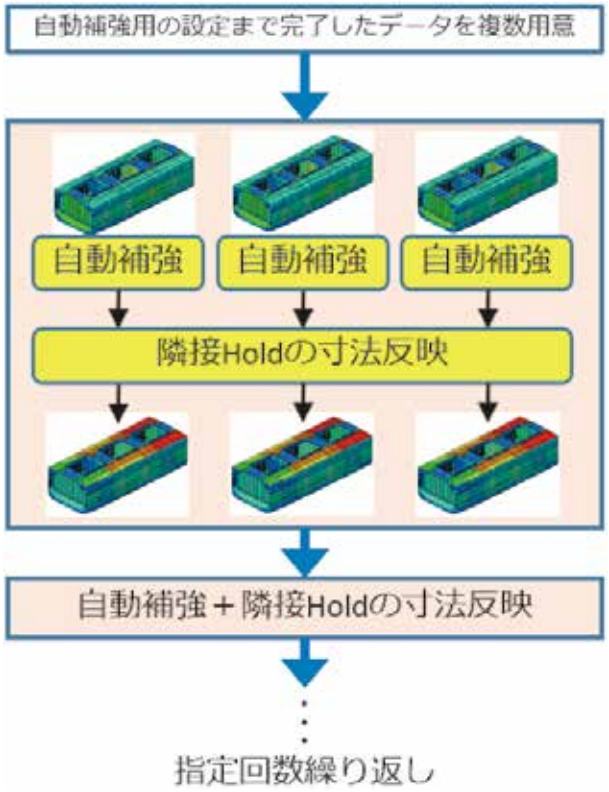
第2章および第4章でそれぞれ，補強検討の自動化と隣接 HOLD の補強寸法反映機能について述べたが，これらの処理を一連のバッチ処理として繰り返し実行するという機能も開発した．事前に複数の 3HOLD モデルに対して自動補強の設定を済ませておき，PSJ(Python Scripting for Jupiter)を用いて「自動補強→隣接 HOLD の寸法反映」の処理を指定した回数繰り返すというものである(第10図)．これにより，業務時間内に各 3HOLD モデルの補強設定を済ませておき，帰宅前にこのバッチ処理を実行することで翌朝出社した時には評価結果を満足しつつ隣接 HOLD の補強寸法も反映された複数の 3HOLD モデルが得られる．

### 5．2　レポート出力

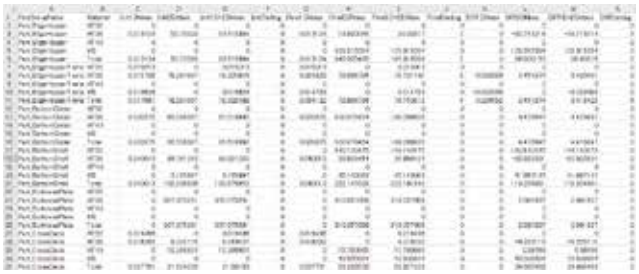
補強前/補強後/板厚差/補強ループの途中経過の情報のうち，任意のものを画面上に表示および Microsoft PowerPoint 形式で出力する機能を開発した．

### 5．3　重量表の出力

自動補強後に部材分類ごとの補強の内容と重量増減を確認出来る重量表が自動で出力される仕様とした．補強の内容は，材料の降伏応力ごとに 1D 要素/2D 要素/1D+2D 要素/カーリング本数について補強前/補強後/補強前後の差分の3項目に細分化されて出力されるため，分析しやすくなっている(第11図)．




第 10 図　バッチ処理の流れ



第 11 図　重量表の出力フォーマット

## 6．今後の課題

従来，数日～1 週間を要していた設計者による補強検討は，補強検討自動化機能の開発により約 1 時間で評価基準をほぼ満足する結果が得られるというところまで短縮できたが，複数の課題が残っている．

1 つ目は，設計者が評価結果を見ながら随時判断している継手の追加や移動，許容するカーリングの本数の上限の特例などである．これらついては，自動補強完了後に設計者が補強結果を確認して手直しし，再評価する必要がある．

2 つ目は，板割りグループ設定に時間が掛かるという点である．板割りグループ設定は，設計者が「同じ板厚」かつ「同じ降伏応力の材料」で補強したい 2D 要素をマウス操作により選択していくもので，評価範囲全ての 2D 要素に対して設定を行うと 3HOLD モデルでも約 1～2 日の工数を要してしまい，自動補強による工数削減効果が薄れてしまう．設定を全くしなければ基本板パネル単位で補強が実施されるため，増厚範囲が板割りベースよりも狭くなり，そこから得られる HOLD の変形および応力は真面目に板割りベースで設定したものから少々乖離したものとなるので自動補強寸法の精度が落ちる．現在は，補強量が大きくなることが予想される部材のみ板割りグループ設定を行うことで工数と精度のバランスを取っている．今後，補強検討自動化機能の利用を進める中で，どこまで詳細に板割りグループ設定をすれば手直しに必要な工数と板割りグループ設定に要する工数の合計工数が最小となるのか知見を積んでいく必要がある．

## 7　今後の展望

### 7．1　新規開発船の構造配置検討・重量推定での活用

約 1 時間で評価基準をほぼ満足した寸法を得ることが出来る機能となったことで，開発着手時には想定していなかった活用法も期待できる．新規開発船の構造配置検討という開発のごく初期段階における CSR HOLD 解析を踏まえた構造評価とケーススタディである．二重底高さやビルジホッパタンクの大きさ，二重底ガーダの配置などを変えたモデルを用意することで最終的にどれくらいの寸法になるか，そして船殻重量はどの程度となるかの目星を付けることが精度よく可能となる．

### 7．2　既存船の寸法・重量削減検討での活用

第 3 章 1 節の一般設定において，評価基準を満足する範囲内でモデル初期板厚よりも薄くするかどうかの設定があり，この設定を有効とすることで既存船の寸法・重量削減検討が可能となる．通常設計において設計者が評価基準を満足しない部材を順次補強していく場合，ある時点では評価基準をギリギリ満足していた部材の評価結果を補強完了時に改めて確認すると余裕が出来ており，結果的に過剰寸法になっていることがある．それに対して補強検討自動化機能では評価基準を満足している部材についても各補強ループの中で毎度必要最小限の寸法・カーリング本数を算出し，必要な板厚・カーリング本数に修正するため，このような過剰な補強は起こらない．この特性を利用して設計者が補強した既存船で再度自動補強機能を実行し寸法・重量削減を検討することが可能である．なお，寸法が減少した部材についてはレポート出力機能や自動出力される重量表で確認できる．

## 8．結言

汎用解析ソフト Jupiter をベースに，HOLD 解析の補強を自動で行う機能を開発した．この補強検討自動化機能により，評価基準を満足した寸法を数時間で得ることが可能となった．補強寸法の精度を向上させたい場合には，任意の追加設定と板割りグループ設定や隣接 HOLD の寸法反映を併せて実施することで，より精度の高い補強寸法を得ることも可能である．

この補強検討自動化機能は前述の CSR で要求される HOLD 解析だけでなく，新規開発船の構造配置検討・重量推定や既存船の寸法・重量削減検討においても活用できるため，当社の CSR HOLD 解析関連の作業において幅広く活用されることが期待される．また，今回の開発の過程で得られた知見を活かして他の構造評価ソフトへの展開も考えていかなければならない．

## 謝辞

最後に，今回の補強検討自動化機能の開発へのご協力と，日頃より多大なサポートを頂いております株式会社テクノスター関係者の皆様に深く御礼申し上げます．

## 参考文献

1）株式会社テクノスター　Jupiter　ホームページ
https://www.e-technostar.com/our-products/
2）一般財団法人日本海事協会　PrimeShip-HULL(DSA)　ホームページ
https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/activities/primeship/brochure/ja/jbro_primeship_hull-dsa.pdf